

## ASOCIACIÓN ENTRE LA COMPOSICIÓN ELEMENTAL DEL SUELO Y LA PLANTA Y LA MORFOLOGÍA DE *DASYLIRION CEDROSANUM* TREL.

## ASSOCIATION BETWEEN SOIL AND PLANT ELEMENTAL COMPOSITION AND MORPHOLOGY OF *DASYLIRION CEDROSANUM* TREL.

EMIR LENIN SERAFÍN-HIGUERA<sup>1</sup>, M. HUMBERTO REYES-VALDÉS<sup>2</sup>, AMÉRICA BERENICE MORALES-DÍAZ<sup>3</sup>,  
 JOSÉ ÁNGEL VILLARREAL-QUINTANILLA<sup>4</sup> Y ADALBERTO BENAVIDES-MENDOZA<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup> Doctorado en Recursos Fitogenéticos para Zonas Áridas, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>2</sup> Departamento de Fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>3</sup> Robótica y Manufactura Avanzada, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Saltillo, Ramos Arizpe, Coahuila, México.

<sup>4</sup> Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>5</sup> Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

\*Autor de correspondencia: [abenmen@gmail.com](mailto:abenmen@gmail.com)

### Resumen

**Antecedentes:** La producción de sotol ha crecido en los últimos años. Existe el interés de establecer monocultivos para mitigar la sobreexplotación de las poblaciones silvestres. Sin embargo, para un establecimiento y manejo eficiente de plantaciones es importante conocer la composición elemental de *Dasyilirion cedrosanum*.

**Hipótesis:** La composición mineral de *Dasyilirion cedrosanum* refleja la composición mineral de la solución del suelo del sitio en donde crece.

**Especie de estudio:** *Dasyilirion cedrosanum* Trel.

**Sitios y años de estudio:** Se muestrearon plantas y suelos durante septiembre y octubre del 2020 en San Lorenzo, Buenavista y General Cepeda, Coahuila.

**Métodos:** Se colectaron tallos, hojas y suelos y se analizaron sus elementos. Además, se midieron caracteres morfológicos a cada espécimen. Los datos se analizaron con técnicas estadísticas multivariadas.

**Resultados:** El Ca y N presentaron alta concentración en el suelo y en las plantas. En las tres localidades los niveles de Se fueron altos en las plantas. No obstante, el Se en la solución del suelo no fue detectable. Los individuos de San Lorenzo y General Cepeda mostraron niveles altos de Cu y Ba, a pesar de que el Cu no fue detectable en el suelo. El crecimiento mostró asociación negativa con el As, Ba, Cd, Cr, Mo, Ni y Pb y el Mg estuvo relacionado con un mayor crecimiento de *Dasyilirion cedrosanum*.

**Conclusiones:** *Dasyilirion cedrosanum* dispone de mecanismos para la adquisición y concentración de los elementos de la solución del suelo, incluso cuando estos estén en concentraciones bajas.

**Palabras clave:** Bario en plantas, explotación de especies vegetales de zonas áridas, nutrición de plantas silvestres, producción en zonas áridas, selenio en plantas, sotol.

### Abstract

**Background:** Sotol production has grown in recent years. There is interest in establishing monocultures to mitigate the overexploitation of wild populations. However, for an efficient establishment and management of plantations it is important to know the elemental composition of *Dasyilirion cedrosanum*.

**Hypotheses:** The mineral composition of sotol reflects the mineral composition of the soil solution where it grows.

**Studied species:** *Dasyilirion cedrosanum* Trel.

**Study site and dates:** Plants and soils were sampled during September and October 2020 in San Lorenzo, Buenavista and General Cepeda, Coahuila.

**Methods:** Stems, leaves and soils were collected and their elements were analyzed. In addition, morphological characters were measured for each specimen. Data were analyzed with multivariate statistical techniques.

**Results:** Ca and N were highly concentrated in the soil and in the plants. In all three localities, Se levels were high in the plants. However, Se in the soil solution was not detectable. Individuals from San Lorenzo and General Cepeda showed high levels of Cu and Ba, although Cu was not detectable in the soil. Growth showed negative association with As, Ba, Cd, Cr, Mo, Ni and Pb and Mg was related to higher sotol growth.

**Conclusions:** *Dasyilirion cedrosanum* has mechanisms for the acquiring and concentrating from elements in the soil solution, even when these are in low concentrations.

**Keywords:** Barium in plants, exploitation of arid zone plant species, wild plant nutrition, production in arid zones, Selenium in plants, Sotol.

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution License CCBY-NC (4.0) internacional.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Las especies del género *Dasyilirion* Zucc. (Asparagaceae) se encuentran en sitios de pastizales y matorrales desérticos en varias regiones del centro y norte de México y el sur de los Estados Unidos. Son plantas perennes, con numerosas hojas que crecen simétricamente desde el tallo, largas, flexibles y cóncavas en la parte inferior. El tallo es corto, robusto y fibroso. En la etapa reproductiva desarrollan una inflorescencia con un eje floral delgado, alto y resistente (Flores-Gallegos *et al.* 2019).

Actualmente, *Dasyilirion cedrosanum* Trel., *D. duranguensis* Trel., *D. wheeleri* S. Watson ex Rothr. y *D. leiophyllum* Engelm. Ex Trel. son utilizadas para elaborar la bebida destilada sotol, la cual constituye una nueva opción de producción para las zonas áridas y semiáridas de México. En los últimos años, la producción de sotol ha cobrado interés y ha generado una demanda creciente (Reyes-Valdés *et al.* 2019). De acuerdo con Madrid-Solórzano *et al.* (2021), esta industria crece en una tasa promedio del 5 % anual. Los estados de Coahuila, Chihuahua y Durango cuentan con la denominación de origen para su elaboración (IMPI 2002).

*Dasyilirion cedrosanum* es la principal especie que se aprovecha para elaborar la bebida sotol en el estado de Coahuila (Cano & Martínez 2007). Sin embargo, la materia prima para la fabricación de esta bebida proviene de poblaciones silvestres. La sobreexplotación, el saqueo y tráfico de plantas ha ocasionado una disminución de estas poblaciones, lo que implica un riesgo para la especie. En la actualidad existe interés por parte de los fabricantes de la bebida en establecer monocultivos de estas plantas, lo que permitiría mitigar la sobreexplotación y contar con materia prima para garantizar la producción en el futuro. No obstante, la ausencia de información básica sobre las relaciones suelo-planta y la nutrición mineral de esta especie vegetal dificulta tomar medidas de mitigación para el aprovechamiento sustentable de *D. cedrosanum* o para su producción en monocultivo (Cano *et al.* 2011).

La composición elemental es fundamental para comprender el crecimiento y rendimiento de las plantas (Rengel *et al.* 2011). En la actualidad se consideran 17 elementos esenciales (C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Cl, Mo y Ni) que son constituyentes de estructuras celulares y metabolitos, mantienen el balance osmótico y la turgencia, forman parte de los mecanismos de transducción y transferencia de energía, de la catálisis enzimática y en los procesos de reproducción y desarrollo vegetal (Pandey 2018).

Sin embargo, los diversos factores que existen en el ambiente como las condiciones atmosféricas, la composición química y la concentración de iones del agua en el suelo, las interacciones químicas entre los compuestos orgánicos y los diferentes nutrientes inorgánicos, el perfil y abundancia del microbioma y los mecanismos de absorción y translocación de nutrientes, influyen en la disponibilidad y en la concentración nutrimental de las plantas afectando su crecimiento y desarrollo (Imenšek *et al.* 2021). A la capacidad que tienen las plantas para mantener un balance nutrimental interno en respuesta a estos factores se le denomina homeostasis estequiométrica (Zhang *et al.* 2020).

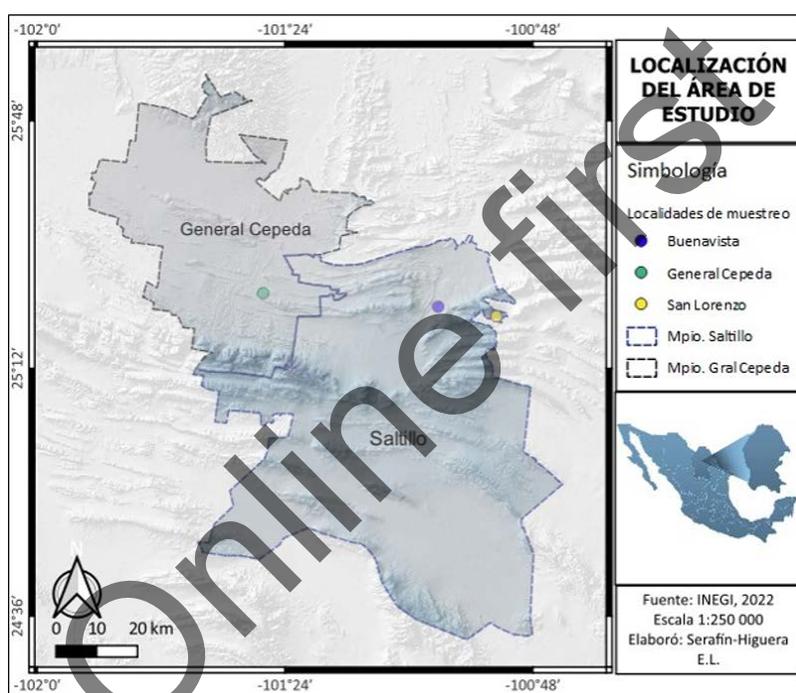
Para un establecimiento y un manejo eficiente en la producción de sotol es importante contar con información acerca de la composición elemental de las plantas, lo que permitirá conocer los minerales que podrían limitar su rendimiento, ya sea por encontrarse en exceso o en deficiencia (Pérez-López 2013). Además, es importante ampliar el conocimiento acerca de la relación suelo-planta, ya que el sistema edáfico es el que permite cubrir la demanda de minerales básicos para el crecimiento y desarrollo de la planta (García *et al.* 2012), además de permitir características morfológicas (rosetas y tallo grandes y plantas con una altura entre 1.50 y 2.00 m) adecuadas para un alto rendimiento (Serafín-Higuera *et al.* 2022).

Es de esperarse que *Dasyilirion cedrosanum* tenga requerimientos de nutrientes minerales análogos a los del resto de las plantas. A pesar de ello, las condiciones ambientales pueden dictar que algunos de los elementos se encuentren en concentraciones o en balances molares diferentes a los observados en las especies de cultivo más estudiadas (Chapin 1980).

Tomando en cuenta lo anterior, el objetivo de esta investigación fue analizar en diferentes localidades la concentración de los elementos minerales de la solución del suelo adenaña a las plantas, y verificar la asociación con los elementos contenidos en las hojas, tallos y caracteres morfológicos de *Dasyilirion cedrosanum*. La hipótesis del estudio es que la composición mineral de *Dasyilirion cedrosanum* refleja la composición mineral de la solución del suelo del sitio de crecimiento. La información obtenida podrá abonar al conocimiento básico acerca de la especie y a la posible producción de estas plantas bajo monocultivo.

## Materiales y métodos

*Colecta de campo.* El trabajo de campo se realizó en septiembre y octubre del año 2020 en las localidades de San Lorenzo (25° 20' 17.8" N; 100° 59' 11.7" O, altitud 1,948 m snm), Buenavista (25° 20' 56.8" N; 101° 01' 42.1" O, altitud 1,799 m snm) y General Cepeda (25° 22' 54.8" N; 101° 27' 08.0" O, altitud 1,466 m snm) pertenecientes al estado de Coahuila (Figura 1). Se utilizó un muestreo sistemático considerando 10 plantas silvestres adultas por localidad. Se colectaron dos hojas jóvenes totalmente expandidas ubicadas en la parte media de la corona de la planta, las cuales se cortaron desde la base del tallo. Estas muestras se conservaron en bolsas de papel etiquetadas. Las muestras de tallo se colectaron de la parte media utilizando un sacabocado de 19 mm. Las muestras colectadas en campo se guardaron en bolsas y se mantuvieron en frío en una hielera hasta llegar al laboratorio.



**Figura 1.** Ubicación de las áreas de estudio.

En el área aledaña a cada planta se hicieron dos levantamientos de suelo a una profundidad de 0 a 30 cm considerando 1 y 3 m de distancia desde el centro de la planta. De cada perfil se colectó aproximadamente 1 kg de suelo.

*Preparación de muestras y análisis de elementos en plantas.* Las muestras de tejido foliar y de tallo se deshidrataron en un horno marca Lumistell a 75 °C durante 72 h. Posteriormente, el material deshidratado se pulverizó en un procesador de alimentos marca Oster modelo 450-10. La digestión de las muestras se llevó a cabo mediante la técnica de Fick *et al.* (1976), que consistió en digerir 0.5 g de muestra deshidratada en ácido nítrico a 100 °C. La solución se filtró a través de papel filtro Whatman (n° 42 sin cenizas) y la cuantificación de los elementos Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Se, Si y Zn se realizó por espectrometría de emisión óptica acoplada a inducción de plasma (ICP - OES marca Perkin Elmer, modelo Optima 8300). El contenido de N se cuantificó mediante el método de Kjeldahl (Horwitz 1971).

*Preparación de muestras y análisis de elementos de la solución de suelos.* Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente en el laboratorio durante cinco días y se tamizaron con una malla del N°10 (2 mm). Con las muestras tamizadas se realizó un extracto de saturación que consistió en pesar 100 g de suelo y añadir 200 ml de agua desionizada en un frasco, el cual se colocó en un agitador orbital a 250 rpm por 20 h y 4 de reposo, fuera de la luz. El líquido obtenido se filtró a través de papel filtro Whatman (grado 42 sin cenizas) y se almacenó fuera de la luz en condiciones de refrigeración (4 °C).

El análisis de los elementos (Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Se, Si y Zn) en las soluciones del suelo se realizó con un espectrómetro de emisión óptica acoplada a inducción de plasma marca Perkin Elmer, modelo Optima 8300. El contenido de N se cuantificó mediante el método de Kjeldahl (Horwitz 1971). El pH se determinó con un medidor de pH de mesa Horiba modelo LAQUA Ph1100-S y la conductividad eléctrica con un conductímetro Hanna modelo HI 98304 (SEMARNAT 2000).

*Medición de caracteres morfológicos de las plantas de Dasyilirion cedrosanum.* Las mediciones de las variables morfológicas indicadoras de crecimiento se obtuvieron de las plantas muestreadas durante la colecta de campo. La altura del tallo (AT) se cuantificó con un flexómetro a partir de la base del suelo hasta donde termina el tallo, el diámetro del tallo (DT) se midió en el eje central utilizando una forcípula de aluminio modelo Haglof Sweden s-882-00, la altura de la planta (AP) se evaluó con un flexómetro desde la base hasta la parte alta de la corona y el diámetro de cobertura (DC) se midió en la parte superior de la corona obteniendo dos mediciones perpendiculares del cual se calculó su promedio.

*Análisis estadísticos.* Se llevó a cabo un análisis exploratorio con la finalidad de analizar la distribución, la relación y la presencia de puntos atípicos en los datos. El análisis de componentes principales fue útil para comprender la relación de los valores de concentración de los elementos de las plantas y de la solución del suelo con las localidades de estudio, pues el objetivo de este análisis es la reducción, descripción y asociación de un conjunto de datos dentro de un sistema de coordenadas relevantes (Barrientos-Rivera *et al.* 2019).

Posteriormente, para determinar si existían diferencias significativas entre los valores de concentración de los elementos de las muestras de plantas y de suelo de cada localidad de estudio, se realizó un análisis de varianza y de comparación de medias utilizando la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ). Finalmente, la asociación del contenido de los elementos de las plantas, de la solución del suelo y de los caracteres morfológicos se llevó a cabo con el análisis de correlación de Pearson, utilizando la prueba de  $t$  ( $P < 0.05$ ) para analizar la significancia de correlación y con la prueba de Shapiro Wilk para analizar la normalidad (Cooksey 2020). Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software R v. 4.1.3 (R Core Team 2022).

## Resultados

*Concentración de elementos de la solución de suelos.* La [Tabla 1](#) muestra el promedio de los valores de concentración del Ba, Ca, K, Mg, Na, S, Si y N. La concentración de los elementos siguientes se encontró por debajo de los límites de detección del espectrómetro ( $\text{mg L}^{-1}$ ), los cuales se anotan entre paréntesis para cada elemento: Al (0.025), As (0.02), B (0.1), Cd (0.01), Cr (0.01), Cu (0.01), Fe (0.01), Li (0.05), Mn (0.02), Mo (0.02), Ni (0.02), P (0.01), Pb (0.02), Se (0.02) y Zn (0.01).

No existió diferencia entre las muestras de suelo tomadas a 1 y 3 m en cuanto a la concentración de elementos. El pH promedio para las muestras fue de 8.3 y los valores promedio de la conductividad eléctrica fueron de 315  $\mu\text{s/cm}$  para 1 m y 402  $\mu\text{s/cm}$  para 3 m ([Tabla 1](#)).

*Concentración de elementos en plantas.* De acuerdo con la [Tabla 1](#), los macroelementos Ca, K y N tuvieron las concentraciones más altas tanto en el tallo como en la hoja en comparación con los demás elementos analizados. El Mg, P y S estuvieron en segundo lugar en cuanto a concentración, seguidos de los restantes microelementos. En comparación con el tallo, la hoja mostró una mayor concentración de los elementos Cu, K, Mg, Mn, N, Na,

**Tabla 1.** Promedio de la concentración elemental del tallo y hoja de *Dasylipton cedrosanum* (mg kg<sup>-1</sup>) y de la solución de los suelos (mg L<sup>-1</sup>).

		Valores de concentración de elementos y de las propiedades fisicoquímicas del suelo																							
Muestras	Tejido / Distancia	As	Ba	B	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Mo	N	Na	Ni	P	Pb	Pb	S	Se	Si	Zn	
Planta	Tallo	111 ± 12.6	16.3 ± 3.39	9.70 ± 0.05	10,080 ± 386	0.98 ± 0.003	0.98 ± 0.003	14.34 ± 3.24	136 ± 13.09	2,701 ± 264	4.88 ± 0.01	636 ± 53													
	Hoja	6.07 ± 0.40	31.6 ± 2.13	7,000 ± 108	1.96 ± 0.007	53 ± 6.68	1.96 ± 0.007	631 ± 29.1	3.49 ± 0.37	16.1 ± 1.25	16.03 ± 0.60														
Suelos	1m	32.2 ± 2.92	15.4 ± 3.30	9.63 ± 0.05	8,562 ± 561	0.96 ± 0.004	0.96 ± 0.004	52 ± 12.1	47.7 ± 2.21	5,238 ± 287	4.79 ± 0.02	735 ± 43.3													
	3m	14.5 ± 0.92	53 ± 6.60	9,800 ± 0.0	1.92 ± 0.009	220 ± 13.17	1.92 ± 0.009	826 ± 41.3	3.6 ± 0.32	11.78 ± 0.43	15.7 ± 0.56														
		0.09 ± 0.01	1.78 ± 0.24	1.17 ± 0.10	0.48 ± 0.07	1.03 ± 0.10	6.79 ± 0.30	210 ± 0.0	8.3	342															
		0.08 ± 0.01	1.74 ± 0.23	1.79 ± 0.15	0.47 ± 0.04	1.36 ± 0.19	6.79 ± 0.30	168 ± 0.007	8.4	402															

\*La conductividad eléctrica (C.E.) se encuentra en unidades de µS/cm.

P y S, y sólo para el Al, Ba, Ca, Fe y Si se observaron valores mayores en el tallo comparados con los niveles de la hoja.

*Correlación entre los elementos de la planta con el suelo y caracteres morfológicos.* Las correlaciones significativas entre los elementos contenidos en la planta con los de la solución del suelo y los caracteres morfológicos se muestran en la [Tabla 2](#). Las correlaciones entre los elementos del tallo y la hoja muestran que el Ba y el Cu tuvieron una mayor asociación. En el caso de las correlaciones entre los elementos del tallo y la hoja con los de la solución del suelo se obtuvo que el Ba y el Mg mostraron las asociaciones positivas más altas. Entre las asociaciones negativas el Ba tuvo los coeficientes más altos con los cationes del suelo Ca y Mg y con la C.E. y pH. Las correlaciones de los elementos del tallo y la hoja con los caracteres morfológicos mostraron al Mg y al P asociados positivamente con AP y DT. Se obtuvieron correlaciones negativas entre los elementos As, Ba, Cd, Cr, Mo, Ni y Pb contenidos en el tallo y la variable AT. Por último, las correlaciones de los elementos de la solución del suelo y los caracteres morfológicos indicaron que el Mg se asoció positivamente con AP y DT. En el caso de las relaciones negativas el Ba se asoció con AT.

*Análisis de componentes principales para los elementos de las plantas y suelos.* Los resultados de los componentes principales de los elementos analizados en hojas y tallos de *Dasyilirion cedrosanum* se muestran en la [Tabla 3](#). En el plano bidimensional ([Figura 2](#)) las variables Fe, Al y Ba estuvieron relacionadas con la localidad de General Cepeda, la localidad de Buenavista con las variables Zn y P y la localidad de San Lorenzo con la variable Cu.

**Tabla 2.** Correlación entre elementos del tallo (T), hoja (H), suelos y morfología de la planta.

Correlaciones	Variable	Variable	Correlación	Valor P
Tallo-Hoja	T-Ba	H-Ba	0.84	<0.01
	T-Cu	H-Cu	0.95	<0.01
	T-Mg	H-Mg	0.63	0.01
Tallo-Suelos	T-Ba	Ba-1m	0.92	<0.01
	T-Ba	Ba-3m	0.88	<0.01
	T-Cu	Ca-3m	0.65	0.01
	T-Mg	Mg-1m	0.68	0.02
	T-Mg	S-1m	0.68	0.02
	T-Ba	Ca-1m	-0.69	0.02
	T-Ba	Mg-1m	-0.79	<0.01
	T-Ba	Ca-3m	-0.80	<0.01
	T-Ba	Mg-3m	-0.86	<0.01
	T-Ba	pH-1m	-0.67	0.01
Tallo-Morfología	T-Ba	C.E.-1m	-0.77	0.02
	T-Ba	C.E.-1m	-0.75	0.02
	T-Mg	AP	0.54	0.02
	T-Mg	DT	0.58	0.02
	T-As	AT	-0.76	0.02
	T-Ba	AT	-0.63	0.02
	T-Cd	AT	-0.72	0.01
	T-Cr	AT	-0.69	0.02
	T-Mo	AT	-0.71	<0.01

Correlaciones	Variable	Variable	Correlación	Valor P
Hoja-Suelos	T-Ni	AT	-0.75	<0.01
	T-Pb	AT	-0.74	<0.01
	H-Ba	Ba-1m	0.86	<0.01
	H-Ba	Ba-3m	0.87	<0.01
	H-Ba	Ca-1m	-0.70	<0.01
	H-Ba	Mg-1m	-0.78	<0.01
	H-Ba	Ca-3m	-0.86	<0.01
	H-Ba	Mg-3m	-0.82	<0.01
	H-Ba	C.E.-1m	-0.78	<0.01
	H-Ba	C.E.-3m	-0.79	<0.01
Hoja-Morfología	H-Mg	DT	0.63	0.02
	H-Mg	AP	0.51	0.03
	H-P	AP	0.56	0.03
Suelos-Morfología	Mg-1m	AP	0.59	0.03
	Mg-1m	DT	0.57	0.03
	Mg-3m	AP	0.54	0.02
	Mg-3m	DT	0.55	0.02
	Ba-1m	AT	-0.61	0.01
	Ba-3m	AT	-0.65	0.01

\*suelos (1m y 3m distancias que se consideraron para tomar las muestras de suelo) y caracteres morfológicos (AP altura de la planta, DT diámetro del tallo y AT altura del tallo).

El análisis de componentes principales de los elementos de la solución del suelo (Tabla 4) mostró que los primeros tres componentes principales explicaron el 77.78 % de la variación total de los datos. En el plano bi-dimensional las variables Ba, Na y Si están más asociadas a la localidad de General Cepeda, mientras que las localidades de Buenavista y San Lorenzo formaron un grupo relativamente homogéneo con influencia del K, Ca y Mg (Figura 3).

*Análisis de comparaciones múltiples entre los elementos y las localidades de estudio.* La Tabla 5 muestra las comparaciones entre las concentraciones de los elementos que mostraron diferencias significativas para las localidades de estudio. El Ba fue el único elemento que discriminó la localidad de General Cepeda tanto en la hoja, tallo y las distancias de 1 m y 3 m de los suelos. El Cu distinguió la localidad de San Lorenzo en la hoja y en el tallo. Los valores más bajos de Ca, Na y S en la hoja y de B y P en el tallo se presentaron en San Lorenzo. La localidad con valores más altos de K en tallos y hojas fue Buenavista. Estas lecturas de los elementos en hoja y tallo no mostraron una asociación obvia con las lecturas obtenidas de la solución del suelo, a excepción del elemento Ba en General Cepeda.

## Discusión

*Concentración de minerales en la solución del suelo.* Los factores ambientales tales como la escasa precipitación, las altas temperaturas, los bajos contenidos de materia orgánica y la acumulación de sales ocasionan que los suelos de

### Composición elemental de *Dasyilirion cedrosanum*

las zonas áridas no tengan las condiciones ideales de concentración de nutrientes, lo que afecta el crecimiento de las plantas debido a una limitada absorción (Velde & Barré 2009, Celaya-Michel & Castellanos-Villegas 2011). Por ejemplo, las concentraciones de Ca, K, Mg y Na de las soluciones de las muestras de suelos (Tabla 1) fueron bajas a diferencia de los datos reportados por Canales-Almendares *et al.* (2021) en solución de suelo no agrícola tratado con fertilizante (Ca 263, Mg 120, Na 75 y K 173 mg L<sup>-1</sup>). Aunque el contenido de N total de la solución del suelo no se considera bajo (Fijałkowski *et al.* 2011), su concentración no se reflejó en los niveles observados en el tallo y hojas de las plantas.

**Tabla 3.** Componentes principales de los elementos determinados en hojas y tallos de *Dasyilirion cedrosanum*.

Variables	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Al	0.156	-0.294	0.163	-0.290	0.345	-0.051
As	0.282	0.126	-0.229	-0.115	0.109	0.162
B	0.276	-0.027	0.118	0.132	-0.074	-0.020
Ba	0.200	-0.380	-0.065	0.179	-0.046	-0.152
Ca	0.167	-0.150	0.166	-0.121	-0.558	0.076
Cd	0.322	0.137	-0.086	0.011	0.046	-0.169
Cr	0.312	0.155	-0.083	0.031	0.021	-0.157
Cu	-0.143	0.125	-0.229	-0.407	-0.289	0.047
Fe	0.124	-0.231	0.102	-0.397	0.248	-0.135
K	-0.04	0.309	0.269	0.046	0.400	0.247
Li	0.311	0.013	-0.196	-0.026	0.040	0.086
Mg	-0.026	0.328	0.405	-0.004	-0.066	-0.119
Mn	0.179	-0.163	0.302	-0.248	-0.219	0.085
Mo	0.289	0.001	-0.232	0.064	0.028	0.163
N	-0.023	0.211	0.105	-0.220	-0.045	-0.584
Na	0.166	-0.033	0.337	0.124	0.148	-0.085
Ni	0.313	0.214	-0.105	-0.000	0.013	0.000
P	0.098	0.180	0.354	0.237	0.009	0.108
Pb	0.314	0.207	-0.110	0.022	0.021	0.004
S	0.233	-0.122	0.257	-0.067	-0.150	-0.108
Se	0.031	-0.102	0.018	0.516	-0.251	-0.084
Si	0.005	0.421	-0.057	-0.106	-0.208	-0.210
Zn	0.084	0.121	0.181	-0.199	-0.175	0.571
Autovalor	2.796	1.726	1.649	1.501	1.222	1.189
Variabilidad (%)	34.01	12.96	11.82	9.80	6.55	6.15
Variabilidad acumulativa (%)	34.01	46.98	58.80	68.6	75.10	81.25

El pH influye en la disponibilidad y en los niveles adecuados de elementos para las plantas (Ibarra Castillo *et al.* 2009). Cantú Silva *et al.* (2018) mencionan que los suelos con un pH entre 5.8 y 7.5 son considerados deseables para la mayoría de los cultivos, ya que en este intervalo hay una mejor asimilación de los nutrientes por las plantas. La clasificación de pH de Costa *et al.* (2021) indica que los suelos muestreados son alcalinos (Tabla 1). Estos se caracterizan por presentar una gran cantidad de carbonatos de Ca que pueden inducir deficiencias de Fe, Zn, Cu, Mn y P (Osman 2013). Otra característica de los suelos muestreados fue la conductividad eléctrica (Tabla 1), la cual fue baja a diferencia de los datos obtenidos por Acosta *et al.* (2011) en suelos agrícolas productivos (1210-4080  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). La conductividad eléctrica baja indica pocos iones disueltos biodisponibles para las plantas, lo cual pudiera explicar

en parte la concentración no detectable de Al, As, B, Cd, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Se y Zn en la solución del suelo. Sin embargo, a pesar de la poca disponibilidad de nutrientes y de las condiciones de pH, el sotol es capaz de desarrollarse en este tipo de suelos (Cano *et al.* 2011), mostrando niveles de nutrientes en tallos y hojas que se consideran adecuados, como es el caso del Fe, Cu, Zn, Ni, Se y Al (Jones 2012).

*Concentración de minerales en las plantas.* Las concentraciones de N, Mn y Na en la hoja y las concentraciones de K, Ca y Mg en el tallo (Tabla 1) son similares a las reportadas por Cruz García *et al.* (2013) en especies de agaves silvestres. Por ejemplo, en *Agave angustifolia* Haw las concentraciones son: hojas: N 8,680, Na 58.8 y Mn 16.0 mg kg<sup>-1</sup>; tallo: Ca 10,250 mg kg<sup>-1</sup>, en *Agave karwinskii* Zucc: hojas: N 8,990 y Mn 16.4 mg kg<sup>-1</sup>; tallo: K 2,750, Ca 10,130 y Mn 6.05 mg kg<sup>-1</sup>. En cambio, en el caso de los individuos de *Agave angustifolia* cultivados (Ríos-Ramírez *et al.* 2021) las concentraciones son de P 6,719, N 14,955, Mg 18,847, K 45,943, Na 779, Zn 338, Fe 55.02 y Cu 46.14 mg kg<sup>-1</sup>. En general, los valores de concentración de elementos en *Dasyilirion cedrosanum* son más bajos a excepción del Cu (Tabla 1).

Algunos estudios han demostrado que las concentraciones adecuadas de Ca, K, N, P, S y Fe en el agave mejoran el crecimiento y desarrollo de las plantas (Ramírez-Santiago *et al.* 2012, García-Martínez *et al.* 2020) y aumentan la biomasa y el contenido de azúcares en el tallo (Barrios Ayala *et al.* 2007), brindándole beneficios que impactan en el rendimiento durante la elaboración de mezcal. En el caso de la bebida destilada sotol, se utilizan principalmente plantas silvestres como materia prima, por lo que el rendimiento de las plantas para la elaboración de esta bebida pudiera encontrarse lejos de su potencial, debido a las condiciones del entorno natural en la que se encuentran. Las altas temperaturas e irradiación, la escasa precipitación, la alta evapotranspiración y las condiciones de los suelos pudieran afectar la biodisponibilidad y absorción de nutrientes, obligando a la planta a invertir mucha energía metabólica en los distintos mecanismos de tolerancia al estrés, así como en la búsqueda, solubilización y absorción de los diferentes elementos, restando energía y otros recursos que podrían aumentar su crecimiento y en consecuencia su rendimiento.

**Tabla 4.** Componentes principales de los elementos de la solución del suelo.

Variables	CP1	CP2	CP3
Ba	0.508	0.139	-0.071
Ca	-0.471	-0.195	0.206
K	-0.125	-0.334	-0.610
Mg	-0.468	-0.252	0.153
Na	0.417	-0.277	0.036
S	0.116	-0.517	0.492
Si	0.310	-0.461	0.193
N	-0.008	0.455	0.524
Autovalor	1.836	1.382	0.9693
Variabilidad (%)	42.16	23.88	11.74
Variabilidad acumulativa (%)	42.16	66.03	77.78

Lo anterior refuerza la noción de que las plantas de *Dasyilirion cedrosanum* han desarrollado mecanismos que le permiten adaptarse a las condiciones ambientales adversas, tales como temperaturas extremas, poca disponibilidad de agua y la baja fertilidad de los suelos (Reyes-Valdés *et al.* 2013). Algunos estudios mencionan que las características de los tejidos foliares (Francisco-Francisco *et al.* 2016), la estructura del tallo y el sistema radical (Reyes-Valdés *et al.* 2013) le brindan beneficios para una mejor absorción, transporte y acumulación de nutrientes y agua, permitiéndole una mayor capacidad de obtención de estos recursos. Sin embargo, el estudio y la comprensión de

Composición elemental de *Dasyilirion cedrosanum*

otros mecanismos relacionados con procesos fisiológicos, metabólicos, genéticos y morfológicos, además del estudio de la participación del microbioma de las plantas en estas respuestas, brindará información valiosa para mejorar el rendimiento y cultivo de esta especie.

Los valores de Cu de 4.03 a 134.1 mg kg<sup>-1</sup> en el tejido foliar de *Dasyilirion cedrosanum* (Tabla 5) fueron más altos en comparación con los datos reportados por Ríos-Ramírez *et al.* (2021) y Cruz García *et al.* (2013) en *Agave angustifolia* Haw (2.9 mg kg<sup>-1</sup>) y *A. karwinskii* (3.2 mg kg<sup>-1</sup>). De acuerdo con Shabbir *et al.* (2020) el nivel crítico de deficiencia de Cu en las plantas oscila entre 1 y 5 mg kg<sup>-1</sup> de peso seco, el contenido óptimo está entre 5 y 30 mg kg<sup>-1</sup> y el límite tóxico está por encima de 20-30 mg kg<sup>-1</sup>. El estudio de Cen-Cen *et al.* (2015) reporta la presencia de minerales tóxicos en tejidos foliares de *A. tequilana*, menciona que es una especie que tolera y acumula altas concentraciones de iones de metales en sus hojas; en particular a Mn<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> y Cu<sup>2+</sup> sin presentar síntomas de toxicidad, convirtiendo a esta especie en un posible agente biorremediador. En el caso de *Dasyilirion cedrosanum*, los datos obtenidos para la localidad de San Lorenzo señalan una gran tolerancia a la acumulación de Cu, pero son necesarias más investigaciones que puedan demostrar la capacidad de acumulación de metales y su posible utilidad como agente biorremediador.

**Tabla 5.** Elementos discriminantes de las localidades de estudio.

Tejido/ Distancias	Concentración de elementos de cada localidad de estudio											
	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Na	P	S		
Hoja	GC	30.2 b	37.9 a	9939.3 a	16.6 b	45.9 ab	4013 b	579.7 b	63.2 a	198.7 b	986 a	
	BV	45.7 a	7.1 b	9520 a	4.03 b	55.2 a	5924 a	956 a	71.2 a	271.1 a	848 a	
	SL	20.6 b	1.1 b	6227.8 b	134.1 a	42 b	5777.4 b	670 b	23.1 b	190.8 b	644 b	
Tallo	B	Ba	Cu	K	Mg	P						
	GC	9.8 a	39.4 a	3.7 b	2489.7 b	433.2 b	72.1 a					
	BV	9.7 a	7.0 b	0.9 b	3871.5 a	858.9 a	70.0 a					
	SL	9.4 b	2.4 b	38.2 a	1743.4 b	617.8 ab	17.3 b					
1 m	Ba	Ca	Mg	Na	Si							
	GC	0.23 a	58.8 b	0.17 c	0.81 a	7.66 a						
	BV	0.03 b	80.6 a	3.03 a	0.25 b	7.2 a						
	SL	0.01 b	78.8 a	2.15 b	0.37 b	5.5 b						
3 m	Ba	Ca	K	Mg	Si							
	GC	0.21 a	54.5 c	1.6 ab	0.17 c	7.66 a						
	BV	0.03 b	74.9 b	2.3 a	2.77 a	7.2 a						
	SL	0.01 b	86.3 a	1.3 b	2.28 b	5.5 b						

\*Comparación de medias ( $P < 0.05$ ) de los elementos de la hoja, tallo y soluciones del suelo para cada localidad de estudio. General Cepeda (GC), Buenavista (BV) y San Lorenzo (SL). Las letras indican grupos con diferencias significativas entre sí.

El Si se presentó con valores bajos en las hojas y el tallo y en la solución del suelo. El contenido mínimo recomendado de Si para una solución es de 28 mg L<sup>-1</sup> (Epstein 1994), valor que contrasta los 6.79 mg L<sup>-1</sup> en la solución del suelo (Tabla 1). Por otro lado, según Jones (2012) los valores menores esperados de Si foliar rondan los 39 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que los valores para *Dasyilirion cedrosanum* no rebasaron los 16.14 mg kg<sup>-1</sup>. El Si es considerado no esencial, pero se ha comprobado que es importante en la tolerancia al estrés abiótico, en el ajuste del desequilibrio de nutrientes y en la disminución de la toxicidad de elementos (El-Saadony *et al.* 2021).

El Se es un elemento asociado también con la tolerancia al estrés y, aunque no fue detectado en la solución del suelo, se encontró en el tallo y en las hojas en concentraciones fisiológicamente relevantes (Tabla 1). De acuerdo con Titov *et al.* (2022) las concentraciones de Se en las plantas se pueden dividir en tres grupos en función de la capacidad para acumular este elemento. El primer grupo incluye a la mayor parte de las plantas, que acumulan pequeñas cantidades de 0.1-1.0 mg kg<sup>-1</sup> en peso seco; el segundo grupo que acumula cantidades hasta de 200 mg kg<sup>-1</sup> y el tercer grupo, denominado hiperacumulador abarca de 1,000 a 15,000 mg kg<sup>-1</sup>. De acuerdo con estos datos, las concentraciones de Se en *Dasyllirion cedrosanum* corresponderían al segundo grupo, aquellas especies capaces de acumular Se con valores considerados altos desde el punto de vista nutricional (Lehotai *et al.* 2016). Se ha demostrado que la acumulación de pequeñas cantidades de Se en las plantas mitiga los impactos negativos del estrés abiótico hídrico, salino, por altas temperaturas y la toxicidad de elementos (Rasool *et al.* 2022). Por lo anterior, existe la posibilidad de que la acumulación de Se en los tallos y hojas de sotol tenga alguna función en la tolerancia al estrés de las plantas.

*Relación entre los minerales de la planta, del suelo y los caracteres morfológicos.* Las concentraciones de Ba presentaron una correlación positiva alta en el tallo y hoja con la concentración en la solución de suelo (Tabla 2). Es decir, a mayor disponibilidad de Ba en el suelo las plantas lo absorben y acumulan en sus tejidos. Este fenómeno es común para los cationes de metales y ocurre posiblemente por tratarse de un catión ubicado en el mismo grupo del Ca y Mg en la tabla periódica, por lo que los mismos transportadores de baja afinidad de Ca y Mg pueden absorberlo (Myrvang *et al.* 2016).

El Ba presente en los tallos y en la solución del suelo mostró asociación negativa con los caracteres morfológicos (Tabla 2). Lo mismo se observó para otros elementos como el As, Cd, Cr, Mo, Ni y Pb contenido en las hojas o tallos. A excepción del Mo y Ni los elementos anteriores son considerados tóxicos e influyen en varios procesos metabólicos y fisiológicos que afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas (Tejada-Jiménez *et al.* 2013, Shahzad *et al.* 2018, Danish *et al.* 2019, Zulfiqar *et al.* 2019, Bali & Sidhu 2021, Peana *et al.* 2021, Kapoor *et al.* 2021). Otra posible explicación es que algún factor edáfico asociado con la biodisponibilidad de estos elementos (ejemplo condiciones redox o interacción con otros elementos en la solución del suelo) pudiera impactar negativamente sobre los caracteres morfológicos mencionados.

El Ba es un elemento que comúnmente se presenta en las plantas, pero hasta el momento no se le conoce ningún beneficio nutricional (Myrvang *et al.* 2016). Sin embargo, en altas concentraciones puede ser tóxico (Peana *et al.* 2021). Madejón (2013) menciona que una concentración de 200 mg kg<sup>-1</sup> es moderadamente tóxica y en 500 mg kg<sup>-1</sup> o más es altamente tóxica. En los suelos, las concentraciones elevadas de Ba se ubican en un rango de 300 a 1,000 mg kg<sup>-1</sup> (Cappuyns 2022). A diferencia de los datos anteriores, los valores de Ba reportados en esta investigación para la planta de *Dasyllirion cedrosanum* y de las soluciones del suelo son bajos (Tabla 1). Este resultado puede deberse en parte a que el Ba es poco intercambiable en la matriz edáfica en comparación con el K, Mg, y Ca (Myrvang *et al.* 2016). Por otro lado, las bajas concentraciones de Ba pudieran deberse a las características fisicoquímicas y a las condiciones mineralógicas de los suelos muestreados. El pH y la falta de materia orgánica influyen en la solubilidad del Ba, puesto que este elemento tiende a aumentar su solubilidad con un pH bajo, en condiciones reductoras y altamente anaeróbicas (Madejón 2013). A pesar de lo anterior, la concentración de Ba resultó una variable importante en esta investigación, ya que, entre las localidades de estudio, General Cepeda tuvo una concentración alta en las muestras de solución del suelo y, dicha diferencia se vio reflejada en las plantas (Tabla 5).

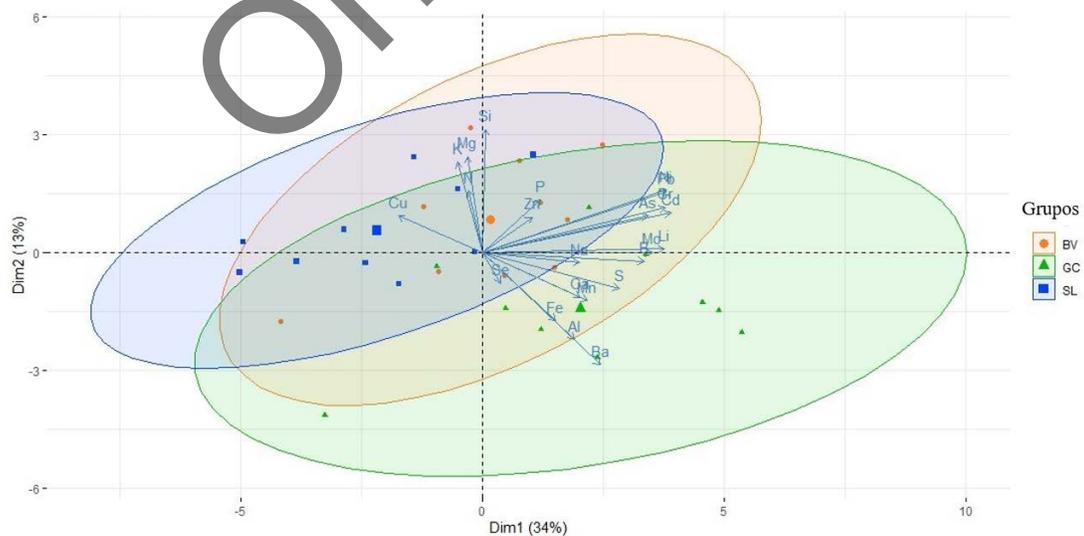
Los resultados muestran que el Mg en la solución del suelo, a pesar de no tener coeficientes de correlación altos, estuvo mayormente relacionado con los caracteres morfológicos, especialmente con la altura de la planta y diámetro del tallo (Tabla 2). Se ha demostrado, que este elemento participa como componente en las estructuras de proteínas, enzimas, clorofilas y hormonas involucradas en varios procesos bioquímicos que mejoran el crecimiento de las plantas (Mao *et al.* 2022). Además, es importante en el movimiento y absorción del P y en la asimilación del N (Yousaf *et al.* 2021). Por tal motivo, el Mg debe ser un elemento a considerar para la nutrición de un monocultivo de *Dasyllirion cedrosanum*.

*Minerales y localidades.* El suelo es un sistema dinámico compuesto de minerales, materia orgánica y organismos (Bruns 2014). Las características del suelo constituyen un resumen histórico de los procesos y las condiciones fisico-químicas y biológicas naturales de un sitio, ya que estas condiciones dependen de la geología, el clima, la geomorfología y los aspectos biogeográficos del área (González 2017). Por tal motivo, el sistema edáfico es fundamental en la determinación de la disponibilidad y la capacidad de absorción de minerales por parte de las plantas, respecto a las condiciones físicas y biológicas que existen en un sitio.

Las representaciones gráficas (Figura 2 y 3) y la Tabla 5 muestran a los elementos que discriminaron las localidades de estudio. El Ba fue el único elemento que diferenció la localidad de General Cepeda tanto en las plantas como en el suelo. Esto pudiera deberse al material parental que presenta la zona, ya que General Cepeda pertenece a las formaciones geológicas Acatita y Treviño en el cual se hallan rocas calizas con yeso y calizas compuestas de minerales de estroncio, fluorita y barita, este último es uno de los minerales que contiene Ba (Canales Gutiérrez & Morán Rosales 2017). En la localidad de San Lorenzo, que se distinguió por la alta concentración de Cu en las plantas, los niveles de este elemento en la solución del suelo no rebasaron los límites de detección del equipo. La única correlación significativa que involucró al Cu en las plantas correspondió al nivel de Ca en la solución del suelo y el Cu en el tallo (Cuadro 2). No se dispone por lo tanto de una explicación acerca del alto contenido de Cu en las plantas de la localidad de San Lorenzo ya que comúnmente la correlación entre la biodisponibilidad del Cu y el nivel de Ca en el suelo es negativa (Rosa *et al.* 2020). Sin embargo, este hecho ilustra lo mucho que aún debe estudiarse acerca de la fisiología y nutrición de *D. cedrosanum*.

Actualmente no se dispone de información acerca de la composición mineral de *Dasyilirion cedrosanum* o de su asociación con la composición de los suelos en donde crece. El estudio fue concebido a partir de la hipótesis de que la composición mineral de *D. cedrosanum* reflejaría la composición de los iones disueltos en la solución del suelo. Las diferencias en las características químicas del suelo darían lugar a distinta composición de las plantas con una composición suelo-planta correlacionada. Los resultados obtenidos no apoyaron la hipótesis ya que, a excepción del Ba, la composición mineral de las hojas y tallos de *D. cedrosanum* no reflejó lo observado en la solución del suelo.

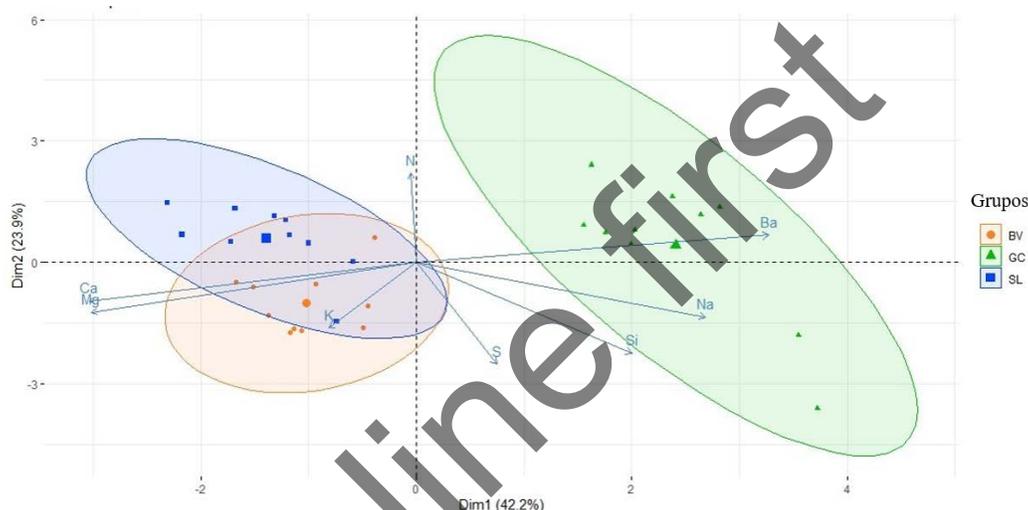
Lo anterior parece indicar que *Dasyilirion cedrosanum* dispone de mecanismos para la adquisición y concentración de los elementos de la solución del suelo, incluso cuando estos se encuentran en concentraciones muy bajas. Pueden



**Figura 2.** Representación gráfica de los componentes principales de elementos de hoja y tallo de *Dasyilirion cedrosanum* y su distinción por localidades. Buenavista (BV), General Cepeda (GC) y San Lorenzo (SL).

mencionarse entre estos mecanismos de colecta de nutrientes la extrusión de metabolitos en los exudados radicales para solubilizar y complejar los elementos (Nansahwang *et al.* 2022), la promoción del microbioma radical (Zhou *et al.* 2022) y la utilización de proteínas como las fosfatasa acidas que solubilizan los nutrientes asociados con las arcillas y materia orgánica del complejo de intercambio (Guo *et al.* 2022).

La información de la composición mineral del suelo y de *Dasyilirion cedrosanum* es clave para conocer la condición nutricional de la planta y la demanda de algunos elementos adquiridos del suelo. Actualmente el incremento en la producción de la bebida sotol puede obligar a los fabricantes de la bebida a establecer plantaciones de dicha especie. Por lo tanto, la información obtenida permitiría establecer las bases de la fertilización del cultivo haciendo un uso eficiente de los minerales para incrementar los rendimientos de los suelos, la biofortificación de la planta para aumentar su rendimiento y la acumulación de minerales en tejidos en una forma no toxica (Jaiswal *et al.* 2022).



**Figura 3.** Representación gráfica de los componentes principales de elementos de solución del suelo y su distinción por localidades. Buenavista (BV), General Cepeda (GC) y San Lorenzo (SL).

### Agradecimientos

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) por su apoyo y financiamiento para esta investigación. A la Dra. A. Antonio-Bautista de la UAAAN, a la Dra. G. Barrientos-Rivera y, a la Lic. Ma. S. García Guillermo del CINVESTAV Unidad Saltillo por el apoyo prestado a las actividades de colecta y análisis de las muestras vegetales y del suelo. A los revisores y al editor de sección por su valioso tiempo en la revisión de este artículo.

### Literatura citada

- Acosta JA, Faz A, Jansen B, Kalbitz K, Martínez-Martínez S. 2011. Assessment of salinity status in intensively cultivated soils under semiarid climate, Murcia, SE Spain. *Journal of Arid Environments* **75**: 1056-1066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.05.006>
- Bali AS, Sidhu GPS. 2021. Arsenic acquisition, toxicity and tolerance in plants-From physiology to remediation: A review. *Chemosphere* **283**: 131050. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131050>

- Barrientos-Rivera G, Esparza-Ibarra EL, Segura-Pacheco HR, Talavera-Mendoza O, Sampedro-Rosas ML, Hernández-Castro E. 2019. Caracterización morfológica de *Agave angustifolia* y su conservación en Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* **10**: 655-668. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1554>
- Barrios Ayala A, Ariza Flores R, Molina Muñoz JM, Espinosa Paz H, Bravo Mosqueda E. 2007. *Manejo de la fertilización de magueyes mezcaleros cultivados (Agave spp) de Guerrero*. Iguala, Gro. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). ISBN: 970-43-0052-2
- Bruns MA. 2014. Sustainable Soil Health. In: Ricroch A, Chopra S, Fleischer S, eds. *Plant Biotechnology*. Switzerland: Springer, pp. 209-223. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-06892-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06892-3_17)
- Canales Gutiérrez LE, Morán Rosales FI. 2017. Geología. In: *La biodiversidad en Coahuila. Estudio de Estado. Vol I*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). pp. 55-69. ISBN: 978-607-8570-01-0
- Canales-Almendares JE, Borrego-Escalante F, Narvaez-Ortíz WA, González-Morales S, Benavides-Mendoza A. 2021. Impacto de diferentes fertilizantes en la solución del suelo y el crecimiento de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* **26**: 105-117. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2941>
- Cano PA, Martínez BOU. 2007. *Determinación de áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones de sotol (Dasyilirion cedrosanum Trel.) en el estado de Coahuila*. Saltillo, Coahuila México: (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) INIFAP. ISBN: 978-970-43-0277-1
- Cano PA, Martínez BOU, Berlanga RCA, Villavicencio GEE, Castillo QD. 2011. *Guía para la evaluación de existencias de sotol (Dasyilirion cedrosanum Trel.) en poblaciones naturales del estado de Coahuila*. Saltillo, Coahuila México: INIFAP. ISBN: 978-607-425-593-5
- Cantú Silva I, Díaz García KE, Yáñez Díaz MI, González Rodríguez H, Martínez Soto RA. 2018. Caracterización físicoquímica de un calcisol bajo diferentes sistemas de uso de suelo en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* **9**: 59-86. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.153>
- Cappuyns V. 2022. Monitoring of total and extractable barium concentrations in floodplain soils. *Journal of Soils and Sediments* **22**: 2948-2957. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03178-z>
- Celaya-Michel H, Castellanos-Villegas AE. 2011. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana* **29**: 343-356.
- Cen-Cen ER, Gómez-Merino F, Martínez-Hernández A. 2015. Tolerancia de *Agave tequilana* a altas concentraciones de cationes metálicos divalentes. *Polibotánica* **40**: 163-182.
- Chapin FS. 1980. The Mineral Nutrition of Wild Plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* **11**: 233-260. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.es.11.110180.001313>
- Cooksey RW. 2020. Correlational statistics for characterizing relationships. In: *Illustrating Statistical Procedures: Finding Meaning in Quantitative Data*. Springer Nature. Singapore, pp. 141-239. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-2537-7>
- Costa S, Purdue L, Dufour A, Charbonnier J. 2021. An oasis soil reference collection for the identification and study of ancient cultivated soils in arid environments (Oasis of Masafi, United Arab Emirates). *Geoarchaeology* **36**: 404-428. DOI: <https://doi.org/10.1002/gea.21845>
- Cruz García H, Enríquez-del Valle JR, Velasco Velasco VA, Ruiz Luna J, Campos Ángeles GV, Aquino García DE. 2013. Nutrimientos y carbohidratos en plantas de *Agave angustifolia* Haw. y *Agave karwinskii* Zucc. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (Número especial) **6**: 1161-1173. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i6.1280>
- Danish S, Kiran S, Fahad S, Ahmad N, Ali MA, Tahir FA, Nasim W. 2019. Alleviation of chromium toxicity in maize by Fe fortification and chromium tolerant ACC deaminase producing plant growth promoting rhizobacteria. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **185**: 109706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109706>
- El-Saadony MT, Desoky ESM, Saad AM, Eid RS, Selem E, Elrys AS. 2021. Biological silicon nanoparticles improve *Phaseolus vulgaris* L. yield and minimize its contaminant contents on a heavy metals-contaminated saline soil. *Journal of Environmental Sciences* **106**: 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.012>

- Epstein E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **91**: 11-17. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>
- Fick KR, Miller SM, Funk JD, McDowell LR, Houser RH. 1976. *Methods of Mineral Analysis for Plant and Animal Tissues*. Gainesville, Florida: Universidad de Florida.
- Fijałkowski K, Rosikoń K, Grobelak A, Kacprzak M. 2011. Migration of various chemical compounds in soil solution during induced phytoremediation. *Archives of Environmental Protection* **37**: 49-59.
- Flores-Gallegos A C, Cruz-Requena M, Castillo-Reyes F, Rutiaga-Quiñones OM, Torre LS, Paredes-Ortíz A, Rodríguez-Herrera R. 2019. Sotol, an alcoholic beverage with rising importance in the worldwide commerce. In: Mihai GA, Maria HA, eds. *Alcoholic Beverages*. Kidlington: Elsevier Reino Unido, pp. 141-160. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815269-0.09995-5>
- Francisco-Francisco N, García-Osuna HT, Benavides-Mendoza A, Hernández-Juárez A, Ramírez Godina F. 2016. Morfología y anatomía foliar de *Dasyliirion cedrosanum* en diferentes etapas de desarrollo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* **7**: 1679-1687. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.161>
- García Y, Ramírez W, Sánchez S. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes* **35**: 125-138.
- García-Martínez LI, Sánchez-Mendoza S, Bautista-Cruz A. 2020. Combinación de hongos micorrizicos y fertilización fosforada en el crecimiento de dos agaves silvestres. *Terra Latinoamericana* **38**: 771-780. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.702>
- González M. 2017. Una aproximación al producto mineralógico del ambiente edáfico por la acción de los elementos climáticos. *Terra Nueva Etapa* **33**: 189-205.
- Guo L, Wang C, Shen RF. 2022. Stronger effects of maize rhizosphere than phosphorus fertilization on phosphatase activity and phosphorus-mineralizing-related bacteria in acidic soils. *Rhizosphere* **23**: 100555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100555>
- Horwitz W. 1971. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Washington, USA: AOAC International. ISBN 0935584145.
- Ibarra Castillo D, Ruiz Corral JA, González Eguiarte DR, Flores Garnica JG, Díaz Padilla G. 2009. Distribución espacial del pH de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. *Agricultura Técnica en México* **35**: 267-276.
- Imenšek N, Sem V, Kolar M, Ivančič A, Kristl J. 2021. The distribution of minerals in crucial plant parts of various elderberry (*Sambucus* spp.) interspecific hybrids. *Plants* **10**: 653. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10040653>
- IMPI [Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial]. 2002. Declaración de protección a la denominación de origen sotol. Diario Oficial de la Federación. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/494502/DO.Sotol.08.08.2002.pdf> (accessed July 1, 2022).
- Jaiswal DK, Krishna R, Chouhan GK, de Araujo Pereira AP, Ade AB, Prakash S, Verma JP, Kumar VS, Prasad R, Yadav J. 2022. Bio-fortification of minerals in crops: current scenario and future prospects for sustainable agriculture and human health. *Plant Growth Regulation* **98**: 5-22. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00847-4>
- Jones JJB. 2012. *Plant Nutrition and Soil Fertility Manual*. New York, USA: CRC Press Taylor & Francis. ISBN 978-1-4398-1609-7.
- Kapoor D, Singh S, Ramamurthy PC, Jan S, Bhardwaj S, Gill SS, Singh J. 2021. Molecular consequences of cadmium toxicity and its regulatory networks in plants. *Plant Gene* **28**: 100342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2021.100342>
- Lehotai N, Lyubenova L, Schröder P, Feigl G, Ördög A, Szilágyi K, Erdei L, Kolbert Z. 2016. Nitro-oxidative stress contributes to selenite toxicity in pea (*Pisum sativum* L). *Plant and Soil* **400**: 107-122. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2716-x>
- Madejón P. 2013. Bario. In: Alloway B, eds. *Heavy Metals in Soils*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 507-514. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7\\_19](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_19)

- Madrid-Solórzano JM, García-Alcaraz JL, Jiménez ME, Martínez CE, Blanco FJ. 2021. Life cycle analysis of sotol production in Mexico. *Sustainable Food Systems* **5**: 769478. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.769478>
- Mao Y, Chai X, Zhong M, Zhang L, Zhao P, Kang Y, Yang X. 2022. Effects of nitrogen and magnesium nutrient on the plant growth, quality, photosynthetic characteristics, antioxidant metabolism, and endogenous hormone of Chinese kale (*Brassica albogabra* Bailey). *Scientia Horticulturae* **303**: 111243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111243>
- Myrvang MB, Bleken MA, Krogstad T, Heim M, Gjengedal E. 2016. Can liming reduce barium uptake by agricultural plants grown on sandy soil? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **179**: 557-565. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201600104>
- Nansahwang A, Leksungnoen P, Armatmontree C, Aramrak S, Kongsil P, Wisawapipat W. 2022. Phosphate mineral solubility controls on cassava root exudates, rhizosphere nutrient availability, and plant nutrient accumulation. *Rhizosphere* **23**: 100575. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100575>
- Osman KT. 2013. Plant nutrients and soil fertility management. In: Osman KT, eds. *Soils*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 129-159. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2_10)
- Pandey N. 2018. Role of plant nutrients in plant growth and physiology. In: Hasanuzzaman M, Fujita M, Oku H, Nahar K, Hawrylak-Nowak B, eds. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*. Singapore: Springer, pp. 51-93. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_2)
- Peana M, Medici S, Dadar M, Zoroddu MA, Pelucelli A, Chasapis CT, Björklund G. 2021. Environmental barium: Potential exposure and health-hazards. *Archives of toxicology* **95**: 2605-2612. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-021-03049-5>
- Pérez-López E. 2013. Análisis de fertilidad de suelos en el laboratorio de Química del Recinto de Grecia, Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica. *InterSedes* **14**: 06-18.
- R Core Team. 2022. *R: A language and environment for statistical computing*. Viena: Austria: R Foundation. <https://www.r-project.org/> (accessed July 1, 2022).
- Ramírez-Santiago P, Velasco-Velasco VA, Ruiz-Luna J, Enríquez-del Valle JR, Campos-Ángeles GV, Rodríguez-Ortiz G, Preciado-Rangel P. 2012. Inducing Nutrient deficiencies of nitrogen, phosphorus, potassium, sulfur and iron in *Agave potatorum* Zucc. *Acta Horticulturae* **947**: 249-254. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.947.31>
- Rasool A, Shah WH, Mushtaq NU, Saleem S, Hakeem KR, Rehman R. 2022. Amelioration of salinity induced damage in plants by selenium application: a review. *South African Journal of Botany* **147**: 98-105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.12.029>
- Rengel M, Gil F, Montaña J. 2011. Crecimiento y dinámica de acumulación de nutrientes en caña de azúcar: II. Micronutrientes. *Bioagro* **23**: 135-140.
- Reyes-Valdés MH, Benavides-Mendoza A, Ramírez-Rodríguez H, Villarreal-Quintanilla JA. 2013. Biología e importancia del sotol (*Dasyilirion* spp). Parte II: Ecofisiología, usos e interrogantes. *Planta* **8**: 16-20.
- Reyes-Valdés MH, Palacios R, Rivas-Martínez EN, Robledo-Olivo A, Antonio-Bautista A, Valdés-Dávila CM, Villarreal-Quintanilla JA, Benavides-Mendoza A. 2019. The sustainability of Mexican traditional beverage sotol: ecological, historical, and technical issues. *Processing and sustainability of beverages* **2**: 103-137. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815259-1.00004-5>
- Ríos-Ramírez SC, del Valle JRE, Ortiz GR, Luna JR, Velasco VV. 2021. El crecimiento de *Agave angustifolia* Haw. Con relación a la condición nutrimental. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* **12**: 865-873. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2638>
- Rosa DJ, Ambrosini VG, Kokkoris V, Brunetto G, Hart M, Ricachenevsky F, Pescador R. 2020. Lime protection for young vines exposed to copper toxicity. *Water Air and Soil Pollution* **231**: 296. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04662-3>
- SEMARNAT [Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales]. 2000. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. 2da Sección, 31 de diciembre de 2002.

- Serafin-Higuera EL, Antonio-Bautista A, Benavides-Mendoza A. 2022. Morfología de *Dasyilirion cedrosanum* y su correlación con imágenes en localidades del Sureste de Coahuila. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* **9**: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3198>
- Shabbir Z, Sardar A, Shabbir A, Abbas G, Shamshad S, Khalid S, Shahid M. 2020. Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. *Chemosphere* **259**: 127436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127436>
- Shahzad B, Tanveer M, Rehman A, Cheema SA, Fahad S, Rehman S, Sharma A. 2018. Nickel; whether toxic or essential for plants and environment – A review. *Plant Physiology and Biochemistry* **132**: 641-651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.10.014>
- Tejada-Jiménez M, Chamizo-Ampudia A, Galván A, Fernández E, Llamas Á. 2013. Molybdenum metabolism in plants. *Metallomics* **5**: 1191-1203. DOI: <https://doi.org/10.1039/c3mt00078h>
- Titov AF, Kaznina NM, Karapetyan TA, Dorshakova NV, Tarasova, VN. 2022. Role of selenium in plants, animals, and humans. *Biology Bulletin Reviews* **12**: 189-200. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079086422020104>
- Velde B, Barré P. 2009. Plants and soils: the ecological paradigm of plants and clays. In: Velde B, Barré P, eds. *Soils, Plants and Clay Minerals*. Berlin: Springer. pp. 305-313. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-03499-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-03499-2_7)
- Yousaf M, Bashir S, Raza H, Shah AN, Iqbal J, Arif M, Hu C. 2021. Role of nitrogen and magnesium for growth, yield and nutritional quality of radish. *Saudi Journal of Biological Sciences* **28**: 3021-3030. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.02.043>
- Zhang J, Wang Y, Cai C. 2020. Multielemental stoichiometry in plant organs: a case study with the alpine herb *Gentiana rigescens* across southwest China. *Frontiers in Plant Sciences* **11**: 441. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00441>
- Zhou Y, Wei Y, Zhao Z, Li J, Li H, Yang P, Denton MD. 2022. Microbial communities along the soil-root continuum are determined by root anatomical boundaries, soil properties, and root exudation. *Soil Biology and Biochemistry* **171**: 108721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108721>
- Zulfiqar U, Farooq M, Hussain S, Maqsood M, Hussain M, Ishfaq M, Anjum MZ. 2019. Lead toxicity in plants: Impacts and remediation. *Journal of Environmental Management* **250**: 109557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109557>

---

**Editor de sección:** Joel Flores

**Contribuciones de los autores:** ELSH realizó el trabajo de campo, de laboratorio y redactó el manuscrito, MHRV asesoró en los análisis estadísticos, ABMD y JAVQ aportaron en los análisis de laboratorio y ABM colaboró con la gestión del proyecto, interpretación de los resultados y en la revisión y redacción del manuscrito.